ОвчаренкоЕвгенийАндреевичБиотехническаясистемабесшовнойимплантацииаортальногоклапанасердцадиссертациякандидатаТехническихнаукОвчаренкоЕвгенийАндреевичМестозащитыМосковскийгосударственныйтехническийуниверситетимениНЭБауманаМосквас

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«Научно-исследовательский институт

комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний»

На правах рукописи

ОВЧАРЕНКО ЕВГЕНИЙ АНДРЕЕВИЧ

**БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА БЕСШОВНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АОРТАЛЬНОГО КЛАПАНА СЕРДЦА**

Специальности 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, 01.02.08 – Биомеханика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Саврасов Геннадий Викторович

Москва – 2016

2

**СОДЕРЖАНИЕ**

Стр.  
[ВВОДИМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ 4](#bookmark0)

[ВВЕДЕНИЕ 5](#bookmark1)

[ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ 13](#bookmark2)

1. [Эпидемиология аортального стеноза 13](#bookmark3)
2. [Методы лечения аортального стеноза 16](#bookmark4)
3. [Малоинвазивные способы лечения аортального стеноза 18](#bookmark5)
4. [Анализ влияния конструктивных особенностей бесшовно-](#bookmark6)

[имплантируемых протезов клапана аорты на клинические  
результаты 21](#bookmark6)

[1.5. Дизайн протезов с бесшовным способом фиксации 24](#bookmark7)

[ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 32](#bookmark8)

[ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО КОМПОНЕНТА](#bookmark9)

[БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 34](#bookmark9)

1. [Исследование анатомии корня аорты человека 42](#bookmark10)
2. [Исследование физико-механических свойств корня аорты](#bookmark11)

[человека 52](#bookmark11)

[2.3. Верификация компьютерных моделей корня аорты человека и](#bookmark12)

[материала для их описания 56](#bookmark12)

[ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 61](#bookmark13)

[ГЛАВА 3. ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ БЕСШОВНО-ИМПЛАНТИРУЕМЫХ БИОПРОТЕЗОВ КЛАПАНА АОРТЫ .... 63](#bookmark14)

[3.1. Выбор геометрических параметров ячейки протеза клапана аорты с](#bookmark15)

[бесшовным способом фиксации 63](#bookmark15)

[3.2. Проектирование створчатого аппарата 80](#bookmark16)

[3.2.1. Исследование способности биоматериала к сжатию 81](#bookmark17)

3

Стр.

[3.2.2. Исследование створчатого аппарата методом конечных  
элементов 94](#bookmark18)

[3.2.3. Исследование гидродинамики створчатого аппарата  
тубулярного протеза 106](#bookmark19)

[ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 116](#bookmark20)

[ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ БИОПРОТЕЗА 118](#bookmark21)

1. [Верификация моделирования имплантации биопротеза методом конечных элементов 118](#bookmark22)
2. [Выбор дизайна каркаса биопротеза клапана аорты с бесшовным способом фиксации 137](#bookmark23)
3. [Анализ функциональных характеристик биотехнической системы «протез-корень аорты» на основе выбранной модели бесшовно-имплантируемого протеза 150](#bookmark24)
4. [Моделирование имплантации разработанного биопротеза методом конечных элементов 151](#bookmark25)
5. [Исследование гидродинамической функции разработанного биопротеза 157](#bookmark26)

[ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 163](#bookmark27)

[ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ 165](#bookmark28)

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 166

4

**ВВОДИМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ**

|  |  |
| --- | --- |
| **БТС** | Биотехническая система |
| **ГА** | Глутаровый альдегид |
| **ДЭЭ** | Диглицидиловый эфир этиленгликоля |
| **КРС** | Крупный рогатый скот |
| мкэ | Метод конечных элементов |
| мскт | Мультиспиральная компьютерная томография |
| **САПР** | Средства автоматизированного проектирования |
| стс | Синотубулярное сочленение |
| **ФК** | Фиброзное кольцо |
| **ЭхоКГ** | Эхокардиография |

5

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы исследования.** На сегодняшний день аортальный  
стеноз является наиболее распространенным пороком клапана сердца и имеет  
выраженную возрастную корреляцию: данному заболеванию подвержено от 2,5%  
в возрасте 75 лет, до 8% в возрасте 85 лет, что составляет 54% всех клапанных  
патологий [[29,](#bookmark57) [46]](#bookmark74). С момента обнаружения первых симптомов приблизительно  
50% больных с тяжелым аортальным стенозом без оперативного вмешательства  
погибают в течение двух лет [[123]](#bookmark151). Хирургическая коррекция аортального  
стеноза, в частности протезирование клапана, демонстрирует

удовлетворительные отдаленные результаты, однако в среднем около 33% пациентов не подвергаются оперативному вмешательству ввиду тяжести исходного состояния и высокого риска периоперационной летальности [[54](#bookmark82)].

В качестве альтернативы для пациентов с аортальным стенозом высокого  
риска выступил новый метод малоинвазивной бесшовной имплантации протеза  
клапана аорты, впервые выполненный в 2002 году. [[101](#bookmark129)]. Впоследствии появилось  
множество новых устройств, предназначенных для малоинвазивной

имплантации: как транскатетерным, так и прямым хирургическим способом [[152](#bookmark180)].  
Однако, несмотря на безусловное преимущество данного подхода, позволяющего  
снизить периоперационную летальность и существенно ускорить реабилитацию,  
данный метод сопряжен с риском возникновения опасных осложнений,  
обусловленным особенностями конструкции каркаса протеза: гемодинамически  
значимая регургитация, атриовентрикулярная блокада [[60](#bookmark88), [78,](#bookmark106) [101,](#bookmark129) [102,](#bookmark130) [109,](#bookmark137) [111](#bookmark139),  
[145]](#bookmark173), а также осложнения, требующие экстренного хирургического

вмешательства – дислокация протеза, перекрытие устьев коронарных артерий, расслоение и разрыв аорты [[63](#bookmark91)].

Существующие осложнения, а также отсутствие единой тактики по выбору биопротеза с бесшовным способом фиксации определенного типа, обуславливают дальнейшее совершенствование данного направления и разработку новых устройств и техник имплантации. В тоже время, анализ взаимосвязи

6

конструктивных особенностей существующих малоинвазивных биопротезов и присущих им клинических осложнений указывают на необходимость более тщательной проработки дизайна, учитывающего анатомические особенности корня аорты, а также выбору адекватных физико-механических характеристик. Таким образом, разработка устройства нового поколения, основанная на использовании комплексного системного подхода и теории БТС является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Общие подходы к выбору топологии стентов [[65,](#bookmark93) [128]](#bookmark156), а также анализ влияния параметров балки ячейки на биомеханическое поведение конечной конструкции [[18](#bookmark46)] представлены в современной литературе. Кроме того, существуют отдельные работы, посвященные изучению функциональных свойств стентоподобных каркасов биопротезов с бесшовным способом фиксации: радиальных сил [[95](#bookmark123)] и сил трения [[92]](#bookmark120), однако вопрос о выборе конкретной конечной геометрии протеза остается открытым ввиду неограниченного количества сочетаний конструктивных элементов и их размеров.

Другим важным конструктивным компонентом является створчатый  
аппарат, геометрия которого оказывает существенное влияние, как на срок работы  
изделия, так и на его функцию, определяющую ближайшую и долгосрочную  
выживаемость реципиентов [[86](#bookmark114), [154](#bookmark182)]. В этой связи, при современной разработке  
подобных медицинских устройств большое внимание уделяют также и дизайну  
створчатого аппарата, однако в различных исследованиях данные об оптимальной  
геометрии существенно расходятся. В частности, в современных исследованиях,  
основанных на МКЭ, приведены различные соотношения для оптимального  
створчатого аппарата, в связи с чем, нельзя полагаться на какое-то определенное  
соотношение базовых параметров [[39,](#bookmark67)  [89,](#bookmark117)  [147]](#bookmark175). Кроме того, на

гидродинамические характеристики согласно клиническим данным существенное влияние оказывает деформация створчатого аппарата при имплантации, однако

7

исследования степени данного влияния в изолированной оценке слабо представлены в литературе [[70,](#bookmark98) [77,](#bookmark105) [87](#bookmark115)].

Не менее важной является и проблема выбора самого биоматериала для створок. Свиной перикард за счет существенно меньшей толщины используют в большинстве конструкций транскатетерных биопротезов [[120]](#bookmark148), поскольку способность створчатого аппарата к сжатию является одним из лимитирующих факторов диаметра доставочной системы. Тем не менее, согласно современным исследованиям перикард крупного рогатого скота также подходит для малоинвазивных клапанов, с точки зрения морфологии, тромбогенности и физико-механических характеристик. Таким образом, вопрос выбора типа перикарда остается открытым ввиду отсутствия исследований в сравнительном аспекте способности биоматериала к сжатию в доставочную систему [[27](#bookmark55)].

Для анализа работы разрабатываемого устройства недостаточно изолированной оценки функционирования его створчатого аппарата и каркаса, поскольку необходимо рассматривать работу устройства как часть БТС «биопротез – корень аорты». Однако, представление моделей корня аорты на основе статистического анализа свойств материала и геометрических параметров для МКЭ в литературе существенно ограничено и не позволяет использовать системный подход при разработке новых медицинских изделий [[129](#bookmark157), [130]](#bookmark158).

Все вышеизложенное, отсутствие в клинической практике биопротеза с бесшовным способом фиксации не имеющего характерных выраженных клинических осложнений, а также отсутствие описания системных подходов к проектированию подобных медицинских устройств позволило сформулировать цель диссертационного исследования.

**Цель исследования:** Разработать протез клапана аорты с бесшовным способом фиксации, предназначенный для хирургического и транссосудистого способа имплантации.

8

Для достижения поставленной цели исследования решались следующие **задачи**:

1. Построить компьютерные модели, состоящие из конечных  
элементов, на основании исследования анатомии и физико-механических свойств  
корня аорты человека.

1. Определить зависимость функциональных характеристик каркаса протеза клапана аорты с бесшовным способом имплантации от пространственной конфигурации и основных геометрических параметров стентовой конструкции.
2. Обосновать оптимальные параметры и предельно-допустимые геометрические условия функционирования тубулярного створчатого аппарата биопротеза на основе консервированного ксеноперикардиального лоскута.
3. Реконструировать и верифицировать биотехническую систему «биопротез с бесшовным способом фиксации – корень аорты».
4. Обосновать выбор конечной конструкции биопротеза с бесшовным способом фиксации.

**Научная новизна диссертационной работы определяется следующими результатами:**

1. Впервые с позиции системного подхода и на основании теории биотехнических систем представлен метод моделирования протеза клапана аорты с бесшовным способом фиксации.
2. Предложены обобщенные модели корня аорты человека, основанные на статистическом анализе его геометрических параметров и физико-механических свойств, позволяющие моделировать методом конечных элементов контактное взаимодействие биопротеза с бесшовным способом фиксации.
3. Получены основные зависимости функциональных характеристик протеза клапана аорты с бесшовным способом имплантации от параметров базовых элементов каркаса.

9

4. Экспериментально установлена зависимость гидродинамических

характеристик и напряженно-деформируемое состояние створчатого аппарата от несоразмерности корня аорты.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Получены биомеханические модели корня аорты на основе конечных элементов, которые могут быть использованы при разработке бесшовно-имплантируемых протезов клапана аорты нового поколения.
2. Разработан принципиальный подход к моделированию бесшовной имплантации протезов клапана аорты, предназначенный для оценки качества имплантации различных устройств и техник.
3. Разработана конструкция биопротеза клапана аорты с бесшовным способом имплантации.
4. Разработанные технологии внедрены в экспериментальную производственную практику ЗАО «НеоКор» (Россия).

**Методология и методы исследования.** Проведенное экспериментальное  
исследование включало в себя комплексную оценку разработанной БТС  
«биопротез – корень аорты» *in silico* и *in vitro* способами с использованием  
численных и физических методов. Эксперименты *in silico* были выполнены на  
основе твердотельного моделирования МКЭ с использованием нелинейных и  
специализированных моделей материалов. Эксперименты *in vitro* проводили на  
базе гидродинамической модели левой половины сердца (в установке  
пульсирующего потока) в случае необходимости оценки функции створчатого  
аппарата, а также с использованием универсальной испытательной машины – для  
изучения свойств биологических материалов и опытных образцов

разрабатываемого каркаса биопротеза.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод моделирования бесшовной имплантации аортального клапана

на основе обобщенных конечно-элементных моделей корня аорты человека, позволяющий моделировать контактное взаимодействие компонентов БТС.

10

1. Параметры стентовой ячейки и пространственной конфигурации каркаса протеза, обеспечивающие минимально необходимые условия бесшовной фиксации с учетом состояния и особенностей тканей корня аорты человека.
2. Зависимость функционирования тубулярного створчатого аппарата биопротеза, предназначенного для бесшовной имплантации, от параметров исходной геометрии, свойств биоматериала и деформации каркаса протеза.
3. Конструкция протеза клапана аорты с бесшовным способом фиксации, состоящая из каркаса на основе сверхэластичного никелида титана и ксеноперикардиального тубулярного створчатого аппарата, обеспечивающая сжатие в катетер до 6 мм.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований:**

Достоверность полученных в работе результатов и выводов обеспечена использованием статистических методов исследования, апробированного способа численного моделирования МКЭ с верификацией постановочных задач, а также сравнением результатов с экспериментальными и литературными данными**.**

**Апробация материалов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

* 4-ом Съезде кардиологов Сибирского федерального округа «Сердечно-сосудистые заболевания: от первичной профилактики до высоких технологий в повседневной практике». Кемерово, 2011;
* Конференции «Актуальные проблемы лабораторной диагностики и биотехнологии». Кемерово, 2012;
* «3-ей Ежегодной научной сессии молодых ученых Кузбасса Наука-Практике». Кемерово, 2013;
* Международной конференции «Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур». Минск (Беларусь), 2013;

11

* Международном форуме «Инженерные системы-2014». Москва, 2014;
* Конференции «XIX Ежегодная сессия ФГБНУ НЦССХ им. А.Н. Бакулева». Москва, 2015;
* «17-ой научно-технической конференции «МЕДТЕХ-2015» Медико-технические технологии на страже здоровья». пос. Партенит (Крым), 2015.

Апробация работы проведена на научном семинаре факультета «Биомедицинская техника» МГТУ им Н. Э. Баумана, на заседании Ученого Совета ФГБНУ «НИИ КПССЗ».

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования отражены в 26 научных работах, в том числе 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, общим объемом 6,65 п.л.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов. Работа изложена на 182 страницах текста, содержит 9 таблиц, 10 формул и 106 рисунков. Указатель используемой литературы содержит 158 источников.

**Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в планировании и проведении исследования, определении цели и задач, выборе необходимых методов для их решения. Анализ данных литературы по теме диссертации, проведение исследований, обработка и интерпретация полученных данных, написание диссертации выполнены лично автором.

Гистологические исследования выполнены Васюковым Г.Ю., м.н.с.  
«Лаборатории клеточных технологий»; клинические данные имплантации  
биопротеза «Corevalve» предоставлены Заведующим «Лаборатории

интервенционных методов диагностики и лечения атеросклероза», профессором, д.м.н. Ганюковым В.И.; данные исследования эхокардиографии – научным сотрудником «Лаборатории ультразвуковых и электрофизиологических методов

12

диагностики» к.м.н. Сизовой И.Н.; данные мультиспиральной компьютерной томографии – к.м.н. Коковым А.Н., Заведующим «Лаборатории рентгеновской и томографической диагностики» ФГБНУ «НИИ КПССЗ». Исследование методом микро компьютерной томографии было выполнено совместно с инженером «Национального исследовательского Томского политехнического университета» Батраниным А.В. Створчатый аппарат разработанного прототипа биопротеза был изготовлен совместно с Директором производства ЗАО «Неокор» Щегловой Н.А.

**Благодарности**

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю профессору, д.т.н. Саврасову Г.В. за консультативную помощь в подготовке диссертации и декану факультета «Биомедицинская техника» МГТУ им Н.Э. Баумана, профессору, д.т.н. Щукину С.И. за общее сопровождение работы.

Автор благодарит за неоценимый вклад и помощь в подготовке диссертации  
коллег «отдела экспериментальной и клинической кардиологии» ФГБНУ «НИИ  
КПССЗ»., в особенности, Клышникова К.Ю., к.б.н. Глушкову Т.В.; Заведующую  
«Лабораторией биопротезирования» ФГБУ «ННИИПК им. акад. Е.Н.  
Мешалкина» Минздрава России, профессора, д.м.н., Журавлеву И.Ю.; а также  
своих непосредственных руководителей Заведующую «Отделом

экспериментальной и клинической кардиологии», д.б.н. Кудрявцеву Ю.А., и академика РАН, профессора, д.м.н. Барбараш Л.С. – Главного научного сотрудника ФГБНУ «НИИ КПССЗ».

**ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Разработан метод моделирования БТС, основанный на использовании  
обобщенных моделей корня аорты, полученных методом статистического анализа,  
позволяющий определить конечную геометрию каркаса биопротеза с бесшовным  
способом фиксации с точностью, сопоставимой с пациент-специфическим  
подходом.

2. Определены минимально необходимые значения параметров стентовой  
ячейки и пространственной конфигурации каркаса протеза на основе  
сверхэластичного никелида титана, обеспечивающие функцию бесшовной фиксации  
с учетом вариативности свойств окружающих тканей.

3. Наибольшую силу, противодействующую смещению кровотока, с учетом  
обеспечения возможности сжатия в катетер, создают конструкции каркаса  
биопротеза клапана аорты с ромбовидной стентовой ячейкой и увеличенным  
диаметром выводной зоны, состоящие из 12 ячеек с шириной балки более 0,3 мм,  
длиной – 5 мм, толщиной более 0,4 мм.

1. Обоснована оптимальная геометрия створчатого аппарата тубулярной конфигурации на основе выбранного биологического материала; определены критические условия ее функционирования.
2. Установлено, что тубулярный створчатый аппарат биопротеза клапана аорты с бесшовным способом фиксации на основе свиного ксеноперикардиального лоскута, консервированного глутаровым альдегидом, с соотношением высоты к диаметру 7:10, обеспечивает достаточные функциональные характеристики в пределах несоответствия диаметра приточный зоны не более 1 мм.

6. Разработана конструкция протеза аортального клапана сердца с бесшовным  
способом фиксации на основе каркаса из сверхэластичного сплава никелида титана,  
которая позволяет осуществить сжатие в катетер 6 мм с последующим  
восстановлением исходной геометрии и необходимое закрепление в просвете аорты,  
обеспечивающая требуемые гидродинамические и механические характеристики  
БТС.

166

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анатомическое обоснование трехмерных моделей корня аорты человека / Е.А. Овчаренко [и др.] // Клиническая физиология кровообращения. 2013. №2. С. 12–20.
2. Барбараш Л.С., Барбараш Н.А., Журавлева И.Ю. Биопротезы клапанов сердца, проблемы и перспективы. Кемерово: Кемеровский полиграфкомбинат, 1995. 400 с.
3. Бегун П.И. Биомеханическое моделирование объектов протезирования. СПб.: Политехника, 2011. 464 с.
4. Бескаркасные биопротезы в хирургии пороков клапана аорты / Г.Г. Хубулава [и др.]. СПб.: «Наука», 2009. 187 с.
5. Бритиков Д.В., Сачков А.С., Муратов Р.М. Функциональная анатомия, биомеханика и гемодинамика аортального клапана. Различные типы протезов в аортальной позиции // Клиническая физиология кровообращения. 2008. № 2. С. 18–34.
6. Выбор дизайна каркаса транскатетерного протеза клапана аорты на основе метода конечных элементов / Е.А. Овчаренко [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. №4, Т.7. С. 909–922.
7. Выбор ксеноперикардиального лоскута для створчатого аппарата транскатетерных биопротезов клапанов сердца / Е.А. Овчаренко [и др.] // Медицинская техника. 2015. № 5. С. 1–4.
8. Выбор оптимальных геометрических параметров ячейки опорного каркаса транскатетерного клапана / Е.А. Овчаренко [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. №6. С. 943–956.
9. Добросердова Т.К. Численное моделирование кровотока при наличии сосудистых имплантатов или патологий: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. М., 2013. 23 с.

167

1. Ермолина Л.М. Острая ревматическая лихорадка. Хронические ревматические болезни сердца. М.: ООО «Издательский дом «М-Вести», 2004. 184 с.
2. Ершов Ю.А., Щукин С.И. Основы анализа биотехнических систем. Теоретические основы БТС: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 526 с.
3. Искусственные клапаны сердца / П.И. Орловский [и др.]. СПб.: ОЛМА Медиа Групп, 2007. 448 с.
4. Исследование геометрии тубулярного створчатого аппарата протеза клапана аорты методом конечных элементов Е.А. Овчаренко [и др.] // Биофизика. 2016. №5, Т.60. С. 1000–1009.
5. К вопросу об анатомии корня аорты. Соотношение диаметров аортального кольца и синотубулярного соединения в норме у взрослых. Идеальная геометрическая модель корня аорты / Л.А. Бокерия [и др.] // Бюллетень научного центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН Сердечно-сосудистые заболевания. 2008. № 4. Т.9. С. 77–85.
6. Клапансберегающие реконструктивные операции в хирургии пороков сердца / Б.А. Константинов [и др.]. М.: «Медицина», 1989. 143 с.
7. Клышников К.Ю., Овчаренко Е.А., Нуштаев Д.В. Способы оптимизации геометрии ячейки каркаса самораскрывающегося клапана аорты // Технологии живых систем. 2014. №3, Т.11. С. 39–45.
8. Нелинейная изотропная модель корня аорты человека / Е.А. Овчаренко [и др.] // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2014. №6. С. 43–47.
9. Нуштаев Д.В. Численное моделирование процессов деформирования сплавов с памятью формы: автореф. дис. канд. тех. наук: 01.02.04. М., 2015. 23 с.

168

1. Овчаренко Е.А. Влияние конструктивных особенностей на клинические результаты имплантации транскатетерных биопротезов клапана аорты. // Вестник хирургии им. И.И. Грекова. 2014. №5, Т.173. С. 86–90.
2. Овчаренко Е.А., Клышников К.Ю., Журавлева И.Ю. Зависимость гидродинамических показателей биопротеза «3F Enable» от степени деформации каркаса // Клиническая физиология кровообращения. 2014. №2. С. 41–47.
3. Парашин В.Б., Зарецкий А.П. Биомеханическое моделирование поведения синусоидального стента проволочного спиралевидного профиля в артерии // Медицинская техника, 2014. № 1. С. 37–39.
4. Парашин В.Б., Иткин. Г.П. Биомеханика кровообращения. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 224 с.
5. Сагалевич B.M., Завалшпин Н.Н. Перемещения и усилия в элементах клапанно-аортального комплекса в диастолу и систолу // Механика композитных материалов. 1985. № 1. С. 114–123.
6. Сазоненков М.А. Анатомо-физиологическое обоснование биопротезирования и реконструктивных операций на клапанах сердца: дис. докт. мед. наук: 14.01.26. М., 2010. 259 с.
7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. 10-е издание, переработанное и дополненное. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 592 с.
8. Функциональная анатомия аортальных клапанов / Б.А. Колесников [и др.]. Хирургия, 1980. № 2. Т3. С. 11–15.
9. A comparative study of bovine and porcine pericardium to highlight their potential advantages to manufacture percutaneous cardiovascular implants / R. Gauvin [et al.] // Journal of Biomaterials Applications. 2013. Vol. 28, No. 4. Р. 552–565.

169

1. A novel simulation strategy for stent insertion and deployment in curved coronary bifurcations: comparison of three drug-eluting stents / P. Mortier [et al.] // Annals of Biomedical Engineering. 2010. Vol. 38, No. 1. Р. 88–99.
2. A prospective survey of patients with valvular heart disease in Europe: The Euro Heart Survey on Valvular Heart Disease / B. Iung [et al.] // European Heart Journal. 2003. Vol. 24. Р. 1231–1243.
3. A three-dimensional computational analysis of fluid–structure interaction in the aortic valve / J. De Hart [et al.] // Journal of Biomechanics. 2003. Vol. 36, No. 1. Р. 103–112.
4. Adhesion molecules in nonrheumatic aortic valve disease: endothelial expression, serum levels and effects of valve replacement / N.K. Ghaisas [et al.] // Journal of the American College of Cardiology. 2000. Vol. 36. Р. 2257–2262.
5. Alavi S.H., Groves E.M., Kheradvar A. The effects of transcatheter valve crimping on pericardial leaflets // The Annals of Thoracic Surgery. 2014. Vol. 97, No. 4. Р. 1260–1266.
6. Anatomy of the aortic valvar complex and its implications for transcatheter implantation of the aortic valve / N. Piazza [et al.] // Circulation: Cardiovascular Interventions. 2008. Vol. 1, No. 1. Р. 74–81.
7. Aortic annulus rupture during transcatheter aortic valve implantation: safe aortic root replacement / A. Eker [et al.] // European Journal of Cardio-Thoracic Surgery. 2012. Vol. 41, No. 5. Р. 1205.
8. Aortic root and valve relationships / K.S. Kunzelman [et al.] // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 1994. Vol. 107. Р. 162–170.
9. Aortic valve histology and its relation with mechanics – preliminary report / A.A. Sauren [et al.] // Journal of Biomechanics. 1980. Vol. 13. Р. 97–104.
10. Aortic valve replacement in the octogenarians: Perioperative outcome and clinical follow-up / P. Kolh [et al.] // European Journal of Cardio-Thoracic Surgery. 1999. Vol. 16. Р. 68–73.

170

1. Aortic valve replacement with a caged ball valve / D.E. Harken [et al.] // American Journal of Cardiology. 1962. Vol. 9. Р. 292–299.
2. Application of finite element analysis to the design of tissue leaflets for a percutaneous aortic valve / A.N. Smuts [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2011. Vol. 1. Р. 85–98.
3. Arri S.S., Poliacikova P., Hildick-Smith D. Percutaneous paravalvular leak closure for symptomatic aortic regurgitation after CoreValve transcatheter aortic valve implantation // Catheterization and Cardiovascular Interventions. 2015. Vol. 85, No. 4. Р. 657–664.
4. Asymmetric mechanical properties of porcine aortic sinuses / N. Gundiah [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. 2008. Vol. 85, No. 5. Р. 1631–1638.
5. Auricchio F., Taylor R.L. Shape-Memory Alloys: Modeling and Numerical Simulations of the Finite-Strain Superelastic Behavior // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1996. Vol. 143. P. 175–194.
6. Auricchio F., Taylor R.L., Lubliner J. Shape-Memory Alloys: Macromodeling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1997. Vol. 146. P. 281–312.
7. Biaxial mechanical properties of porcine ascending aortic wall tissue / M.A. Nicosia [et al.] // The Journal of Heart Valve Disease. 2002. Vol. 11, No. 5. Р. 680–686.
8. Biomechanical comparison of human pulmonary and aortic roots / A.N. Azadani [et al.] // European Journal of Cardio-Thoracic Surgery. 2012. Vol. 41, No. 5. Р. 1111–1116.
9. Carabello B.A., Paulus W.J. Aortic stenosis // Lancet. 2009. Vol. 373. Р. 956– 966.
10. Carrel T., Englberger L., Stalder M. Recent developments for surgical aortic valve replacement: The concept of sutureless valve // Open Journal of Cardiology. 2013. Vol. 4, No. 1. URL: <http://rossscience.org/ARTICLE/OJCAR-4-1.php> (дата обращения 23.09.2015).

171

1. Charitos E.I., Sievers H.H. Anatomy of the aortic root: implications for valve-sparing surgery // Annals of Cardiothoracic Surgery. 2013. Vol. 2, No. 1. Р. 53– 56.
2. Chronic aortic root pressure-loading assessment model / N. Rakow [et al.] // Therapeutic Advances in Cardiovascular Disease. 2015. Vol. 9, No. 2. Р. 40–44.
3. Clinical experience with the second-generation 3f Enable sutureless aortic valve prosthesis / T. Aymard [et al.] // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2010. Vol. 140, No. 2. Р. 313–316.
4. Common femoral artery anatomy is influenced by demographics and comorbidity: implications for cardiac and peripheral invasive studies / G. Schnyder [et al.] // Catheterization and Cardiovascular Interventions. 2001. Vol. 53. Р. 289–295.
5. Computational mechanics of Nitinol stentgrafts / C. Kleinstreuer [et al.] // Journal of Biomechanics. 2008. Vol. 41. Р. 2370–2378.
6. Computer-aided design of the human aortic root / E.A. Ovcharenko [et al.] // Computers in Biology and Medicine. 2014. No 54. P. 109–115.
7. Decision-making in elderly patients with severe aortic stenosis: Why are so many denied surgery? / B. Iung [et al.] // European Heart Journal. 2005. Vol. 26. Р. 2714–2720.
8. Deformation dynamics and mechanical properties of the aortic annulus by 4-dimensional computed tomography: insights into the functional anatomy of the aortic valve complex and implications for transcatheter aortic valve therapy / A. Hamdan [et al.] // Journal of the American College of Cardiology. 2012. Vol. 59, No. 2. Р. 119–127.
9. Deformational dynamics of the aortic root: modes and physiologic determinants / P. Dagum [et al.] // Circulation. 1999. Vol. 100, No. 19. Р. 54–62.
10. Degradation effect of diepoxide fixation on porcine endogenous retrovirus DNA in heart valves: molecular aspects / A. Cyganek-Niemiec [et al.] // The International journal of Artificial Organs. 2012. Vol. 35, No. 1. Р. 25–33.

172

1. Deployment of self-expandable stents in aneurysmatic cerebral vessels: comparison of different computational approaches for interventional planning / A. Bernardini [et al.] // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2011. Vol. 15, No. 3. Р. 303–311.
2. Development and validation of a simple risk score to predict the need for permanent pacing after cardiac valve surgery / B.A. Koplan [et al.] // Journal of the American College of Cardiology. 2003. Vol. 41. Р. 795–801.
3. Dislocation of a transapically implanted aortic valve prosthesis with a functionally bicuspid aortic valve and ascending aortic aneurysm / T. Schroeter [et al.] // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2011. Vol. 59, No. 8. Р. 503– 506.
4. Distensibility of the ascending aorta: Comparison of invasive and noninvasive techniques in healthy men and in men with coronary artery disease / C. Stefanadis [et al.] // European Heart Journal. 1990. Vol. 11. Р. 990–996.
5. Effect of transformation volume contraction on the toughness of superelastic shape memory alloys / W. Yan [et al.] // Smart Material and Structure. 2002. Vol. 11. Р. 947–955.
6. Emergent cardiac surgery during transcatheter aortic valve implantation (TAVI): a weighted meta-analysis of 9,251 patients from 46 studies / H .Eggebrecht [et al.] // EuroIntervention. 2013. Vol. 8, No. 9. Р. 1072–1080.
7. Evolving strategies for the treatment of valvular heart: preclinical and clinical pathways for percutaneous aortic valve replacement / J. Fann [et al.] // Catheterization and Cardiovascular Interventions. 2008. Vol. 71, No. 3. Р. 434– 440.
8. Fast virtual deployment of self-expandable stents: Method and in vitro evaluation for intracranial aneurismal stenting / I. Larrabide [et al.] // Medical Image Analysis. 2012. Vol. 16, No. 3. Р. 721–730.
9. Fatigue and durability of Nitinol stents / A.R. Pelton [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2008. Vol. 1, No. 2. Р. 153–164.

173

1. Finite element analysis of stent deployment: understanding stent fracture in percutaneous pulmonary valve implantation / S. Schievano [et al.] // Journal of Interventional Cardiology. 2007. Vol. 20, No. 6. Р. 546–554.
2. Finn M., Green P. Transcatheter aortic valve implantation in the elderly: who to refer? // Progress in Cardiovascular Diseases. 2014. Vol. 57, No. 2. Р. 215–225.
3. Focused update incorporated into the ACC/AHA 2006 guidelines for the management of patients with valvular heart disease: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (Writing Committee to Revise the 1998 Guidelines for the Management of Patients With Valvular Heart Disease): endorsed by the Society of Cardiovascular Anesthesiologists, Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and Society of Thoracic Surgeons / R.O. Bonow [et al.] // Circulation. 2008. Vol. 118, No. 15. P. 523–661.
4. Geometry and degree of apposition of the CoreValve ReValving system with multislice computed tomography after implantation in patients with aortic stenosis / C.J. Schultz [et al.] // Journal of the American College of Cardiology. 2009. Vol. 54. Р. 911–918.
5. Gizzi A., Vasta M., Pandolfi A. Modeling collagen recruitment in hyperelastic biomaterial models with statistical distribution of the fiber orientation // International Journal of Engineering Science. 2014. Vol. 78. Р. 48–60.
6. [Gnyaneshwar R](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed?term=Gnyaneshwar%20R%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=11996252)., Kumar R.K., [Balakrishnan](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed?term=Balakrishnan%20KR%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=11996252) K.R. Dynamic analysis of the aortic valve using a finite element model // [The Annals of Thoracic Surgery.](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11996252) 2002. Vol. 73, No. 4. Р. 1122–1129.
7. Hopkins R.A. Aortic valve leaflet sparing and salvage surgery: evolution of techniques for aortic root reconstruction // European Journal of Cardio-Thoracic Surgery. 2003. Vol. 24. Р. 886–897.
8. Impact of treatment choice on the outcome of patients proposed for transcatheter aortic valve implantation / M. De Carlo [et al.] // EuroIntervention. 2010. Vol. 6. Р. 568–574.

174

1. Increased radial force improves stent deployment in tricuspid but not in bicuspid stenotic native aortic valves / R. Zegdi [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. 2010. Vol. 89, No. 3. Р. 768–772.
2. Investigation of the tubular leaflet geometry of an aortic heart valve prosthesis by finite-element analysis / E.A. Ovcharenko [et al.] // Biophysics. 2015. Vol. 60, No. 5. P. 827–834.
3. Is it reasonable to treat all calcified stenotic aortic valves with a valved stent? Results from a human anatomic study in adults / R. Zegdi [et al.] // Journal of the American College of Cardiology. 2008. Vol. 51, No. 5. Р. 579–584.
4. Iung B. Management of the elderly patient with aortic stenosis // Heart, 2008. 2008. Vol. 1, No. 1. Р. 519–524.
5. Iung B., Vahanian A. Epidemiology of valvular heart disease in the adult // Nature Reviews Cardiology. 2011. Vol. 8, No. 3. Р. 162–172.
6. Johnson M.A. Strategies to improve diet in older adults // The Proceedings of the Nutrition Society. 2013. Vol. 72, No. 1. Р. 166–172.
7. Kalath S., Tsipouras P., Silver F.H. Non-invasive assessment of aortic mechanical properties // Annals of Biomedical Engineering. 1986. Vol. 14, No. 6. Р. 513–524.
8. Kalejs M., von Segesser L.K. Rapid prototyping of compliant human aortic roots for assessment of valved stents // Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery. 2009. Vol. 8, No. 2. Р. 182–186.
9. Kumar G.P., Mathew L. Self-expanding aortic valve stent-material optimization // Computers in Biology and Medicine. 2012. Vol. 42, No. 11. Р. 1060–1063.
10. Kumar R.K., Tandon R. Rheumatic fever & rheumatic heart disease: the last 50 years // Indian Journal of Medical Research. 2013. Vol. 137, No. 4. Р. 643–658.
11. Large-displacement 3D structural analysis of an aortic valve model with nonlinear material properties / A. Ranga [et al.] // Journal of Medical Engineering & Technology. 2004. Vol. 28, No. 3. Р. 95–103.

175

1. Left ventricular mass regression early after aortic valve replacement / G.T. Christakis [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. 1996. Vol. 62. Р. 1084– 1089.
2. Li K., Sun W. Simulated thin pericardial bioprosthetic valve leaflet deformation under static pressure-only loading conditions: implications for percutaneous valves // Annals of Biomedical Engineering. 2010. Vol. 38, No. 8. Р. 2690–2701.
3. Long-term safety and effectiveness of mechanical versus biologic aortic valve prostheses in older patients: results from the Society of Thoracic Surgeons Adult Cardiac Surgery National Database / J.M. Brennan [et al.] // Circulation. 2013. Vol. 127, No. 16. P. 1647–1655.
4. Manufacturing and hydrodynamic assessment of a novel aortic valve made of a new nanocomposite polymer / B. Rahmani [et al.] // Journal of Biomechanics. 2012. Vol. 45, No. 7. Р. 1205–1211.
5. Mechanisms of the in vivo inhibition of calcification of bioprosthetic porcine aortic valve cusps and aortic wall with triglycidylamine/mercapto bisphosphonate / H.S. Rapoport [et al.] // Biomaterials. 2007. Vol. 28, No. 4. Р. 690–699.
6. Modeling of transcatheter aortic valve replacement: Patient specific vs general approaches based on finite element analysis/ E.A. Ovcharenko [et al.] // Computers in Biology and Medicine. 2016. No. 69. P. 29–36.
7. Mummert J., Sirois E., Sun W. Quantification of biomechanical interaction of transcatheter aortic valve stent deployed in porcine and ovine hearts // Annals of Biomedical Engineering. 2013. Vol. 41, No. 3. Р. 577–586.
8. Nitinol stent design -understanding axial buckling / D.J. McGrath [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2014. Vol. 40. Р. 252–263.
9. Noninvasive evaluation of the aortic root with multislice computed tomography implications for transcatheter aortic valve replacement / L.F. Tops [et al.] // JACC: Cardiovasc Imaging. 2008. Vol. 1, No. 3. Р. 321–330.
10. Numerical analysis of the radial force produced by the Medtronic-CoreValve and Edwards-SAPIEN after transcatheter aortic valve implantation (TAVI) / S.

176

Tzamtzis [et al.] // Medical Engineering & Physics. 2013. Vol. 35, No. 1. Р. 125– 130.

96. Numerical simulation of the dynamics of a bileaflet prosthetic heart valve using a  
fluid-structure interaction approach / M. Nobili [et al.] // Journal of Biomechanics.

2008. Vol. 41, No. 11. Р. 2539–2550.

1. One year follow-up of the multi-centre European PARTNER transcatheter heart valve study / T. Lefevre [et al.] // European Heart Journal. 2011. Vol. 32. Р. 148– 157.
2. Outcomes of elderly patients aged 80 and over with symptomatic, severe aortic stenosis: Impact of patient’s choice of refusing aortic valve replacement on survival / P. Kojodjojo [et al.] // QJM: An International Journal of Medicine. 2008. Vol. 101. Р. 567–573.
3. Peacock J.A. An in vitro study of the onset of turbulence in the sinus of Valsalva // Circulation Research. 1990. Vol. 67, No. 2. Р. 448–460.
4. Percutaneous mitral valve dilatation: single balloon versus double balloon. A finite element study / S. Schievano [et al.] // The Journal of Heart Valve Disease.

2009. Vol. 18, No. 1. Р. 28–34.

1. Percutaneous transcatheter implantation of an aortic valve prosthesis for calcific aortic stenosis: first human case description / A. Cribier [et al.] // Circulation. 2002. Vol. 106. Р. 3006–3008.
2. Permanent pacemaker implantation after isolated aortic valve replacement: incidence, indications, and predictors / S. Dawkins [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. 2008. Vol. 85. Р. 108–112.
3. Permanent pacemaker insertion after CoreValve transcatheter aortic valve implantation: Incidence and contributing factors (the UK CoreValve Collaborative) / M.Z. Khawaja [et al.] Circulation. 2011. Vol. 123, No. 9. Р. 951– 960.

177

1. Persistent annual permanent pacemaker implantation rate after surgical aortic valve replacement in patients with severe aortic stenosis / N.M. Van Mieghem [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. 2012. Vol. 94, No. 4. Р. 1143–1149.
2. Pibarot P., Garcia D., Dumesnil J.G. Energy loss index in aortic stenosis: from fluid mechanics concept to clinical application // Circulation. 2013. Vol. 127, No. 10. Р. 1101–1104.
3. Potential mechanism of annulus rupture during transcatheter aortic valve implantation / K. Hayashida [et al.] // Catheterization and Cardiovascular Interventions. 2013. Vol. 82, No. 5. Р. 742–746.
4. Predictors of moderate-to-severe paravalvular aortic regurgitation immediately after CoreValve implantation and the impact of postdilatation / K. Takagi [et al.] // Catheterization and Cardiovascular Interventions. 2011. Vol. 78, No. 3. Р. 432– 443.
5. Predictors of outcome in severe, asymptomatic aortic stenosis / R. Rosenhek [et al.] // The New England Journal of Medicine. 2000. Vol. 343. Р. 611–617.
6. Procedural and 30-day outcomes following transcatheter aortic valveimplantation using the third generation (18 Fr) corevalverevalving system:results from the multicentre, expanded evaluation registry 1-year following CE mark approval / N. Piazza [et al.] // EuroIntervention. 2008. Vol. 4. Р. 242–249.
7. Procedural, 30 day and one year outcome following CoreValve or Edwards transcatheter aortic valve implantation: results of the Belgian national registry / J.M. Bosmans [et al.] // Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery. 2011. Vol. 12. P. 762–767.
8. Progress and current status of percutaneous aortic valve replacement: results of three device generations of the CoreValve Revalving system / E. Grube [et al.] // Circulation: Cardiovascular Interventions. 2008. Vol. 1. Р. 167–175.
9. Progressive aortic valve calcification: three-dimensional visualization and biomechanical analysis / R. Halevi [et al.] // Journal of Biomechanics. 2015. Vol. 48, No. 3. Р. 489–497.

178

1. Prospective study of asymptomatic valvular aortic stenosis: clinical, echocardiographic, and exercise predictors of outcome / C.M. Otto [et al.] // Circulation. 1997. Vol. 95. Р. 2262–2270.
2. Recommendations for evaluation of prosthetic valves with echocardiography and doppler ultrasound / W.A. Zoghbi [et al.] // Journal of The American Society of Echocardiography. 2009. Vol. 22, No. 9. Р. 975–1014.
3. Recommendations on the management of the asymptomatic patient with valvular heart disease / B. Iung [et al.] // European Heart Journal. 2002. Vol. 23. Р. 1253– 1266.
4. REDO aortic valve replacement: the sutureless approach / G. Santarpino [et al.] // The Journal of Heart Valve Disease. 2013. Vol. 22, No. 5. Р. 615–620.
5. Regression of left ventricular mass after implantation of the sutureless 3f Enable aortic bioprosthesis. / G. Concistre [et al.] // Texas Heart Institute Journal. 2015. Vol. 42, No. 2. Р. 117–123.
6. Relationship of aortic annular eccentricity and paravalvular regurgitation post transcatheter aortic valve implantation with CoreValve / D.T. Wong [et al.] // Journal of Invasive Cardiology. 2013. Vol. 25, No. 4. Р. 190–195.
7. Right anterior mini-thoracotomy direct aortic self-expanding trans-catheter aortic valve implantation: A single center experience / G. Bruschi [et al.] // International Journal of Cardiology. 2015. Vol. 181. P. 437–442.
8. Rodes-Cabau J. Transcatheter aortic valve implantation: current and future approaches // Nature Reviews Cardiology. 2011. Vol. 9, No. 1. Р. 15–29.
9. Rodriguez-Caulo E.A., Araji O.A., Barquero J.M. Transapical aortic valve implantation in bicuspid aortic valves: must be an absolute contraindication? // Research in Cardiovascular Medicine. 2012. Vol. 1, No. 1. Р. 37–39.
10. Role of aortic root motion in the pathogenesis of aortic dissection / C.J. Beller [et al.] // Circulation. 2004. Vol. 109, No. 6. Р. 763–769.
11. Ross J., Braunwald E. Aortic stenosis // Circulation. 1968. Vol. 38, No. 1. Р. 61– 67.

179

1. Sacks M.S., Merryman W.D., Schmidt D.E. On the biomechanics of heart valve function // Journal of Biomechanics. 2009. Vol. 42, No. 12. Р. 1804–1824.
2. Schoen F.J., Levy R.J. Calcification of tissue heart valve substitutes: progress toward understanding and prevention // The Annals of Thoracic Surgery. 2005. Vol. 79. Р. 1072–1080.
3. Severe aortic stenosis in a veteran population: treatment considerations and survival / F.G. Bakaeen [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. 2010. Vol. 89, No. 2. Р. 453–458.
4. Short-term follow up with the 3f Enable aortic bioprosthesis: clinical and echocardiographic results / G. Concistre [et al.] // The Journal of Heart Valve Disease. 2013. Vol. 22, No. 6. Р. 817–823.
5. Simulation and experimental observation of contact conditions between stents and artery models / K. Takashima [et al.] // Medical Engineering & Physics. 2007. Vol. 29, No. 3. Р. 326–335.
6. Simulation of transcatheter aortic valve implantation through patient-specific finite element analysis: two clinical cases / S. Morganti [et al.] // Journal of Biomechanics. 2014. Vol. 47, No. 11. Р. 2547–2555.
7. Simulation of transcatheter aortic valve implantation under consideration of leaflet calcification / C. Russ [et al.] // Conference Proceedings Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Annual International Conference of the IEEE. 2013. Vol. 2013. Р. 711–714.
8. Simulation of transcatheter aortic valve implantation: a patient-specific finite element approach / F. Auricchio [et al.] // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2014. Vol. 17, No. 12. Р. 1347–1357.
9. Sun W., Li K., Sirois E. Simulated elliptical bioprosthetic valve deformation: implications for asymmetric transcatheter valve deployment // Journal of Biomechanics. 2010. Vol. 43, No. 16. Р. 3085–3090.

180

1. Sutureless perceval aortic valve replacement: results of two European centers / T.A. Folliguet [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. 2012. Vol. 93, No. 5. Р. 1483–1488.
2. Sutureless stented aortic valve implantation under direct vision: lessons from a negative experience in sheep / T.M. Joudinaud [et al.] // Journal of Cardiac Surgery. 2007. Vol. 22, No. 1. Р. 13–17.
3. T lymphocyte infiltration in non-rheumatic aortic stenosis: a comparative descriptive study between tricuspid and bicuspid aortic valves / L. Wallby [et al.] // Heart. 2002. Vol. 88. Р. 348–351.
4. [Tamas E.](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed?term=Tam%C3%A1s%20E%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=17578042), Nylander E. Echocardiographic description of the anatomic relations within the normal aortic root // [The Journal of Heart Valve Disease. 2007. Vol. 16, No. 3. Р. 240–246.](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17578042)
5. Ten-year comparison of pericardial tissue valves versus mechanical prostheses for aortic valve replacement in patients younger than 60 years of age / A. Weber [et al.] // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2012. Vol. 144, No. 5. Р. 1075–1083.
6. The cyclical changes and the structure of the base of the aortic valve / M.J. Thubrikar [et al.] // American Heart Journal. 1980. Vol. 99. Р. 217–224.
7. The European System for Cardiac Operative Risk Evaluation (EuroSCORE) is not appropriate for withholding surgery in high-risk patients with aortic stenosis: a retrospective cohort study / D. Kalavrouziotis [et al.] // Journal of Cardiothoracic Surgery. 2009. Vol. 4, No. 32. Р. 1–8.
8. The hemodynamic effects of mechanical prosthetic valve type and orientation on fluid mechanical energy loss and pressure drop in in vitro models of ventricular hypertrophy / M. Thubrikar [et al.] // The Journal of Heart Valve Disease. 1998. Vol. 7, No. 3. Р. 345–354.
9. The logistic EuroSCORE / F. Roques [et al.] // European Heart Journal. 2003. Vol. 24. Р. 881–882.

181

1. The Society of Thoracic Surgeons National Cardiac Surgery Database: current risk assessment / F.H. Edwards [et al.] // The Annals of Thoracic Surgery. 1997. Vol. 63. Р. 903–908.
2. Thirty-day results of the SAPIEN aortic Bioprosthesis European Outcome (SOURCE) Registry: A European registry of transcatheter aortic valve implantation using the Edwards SAPIEN valve / M. Thomas [et al.] // Circulation. 2010. Vol. 122. Р. 62–69.
3. Three dimensional evaluation of the aortic annulus using multislice computer tomography: are manufacturer's guidelines for sizing for percutaneous aortic valve replacement helpful? / C.J. Schultz [et al.] // European Heart Journal. 2010. Vol. 31, No. 7. Р. 849–856.
4. Transcatheter aortic bioprosthesis dislocation: technical aspects and midterm follow-up / G.P. Ussia [et al.] // EuroIntervention. 2012. Vol. 7, No. 11. Р. 1285– 1292.
5. Transcatheter aortic valve implantation: predictors of procedural success—the Siegburg–Bern experience / L. Buellesfeld [et al.] // European Heart Journal.

2010. Vol. 31, No. 8. Р. 984–991.

1. Tubular heart valves from decellularized engineered tissue / Z.H. Syedain [et al.] // Annals of Biomedical Engineering. 2013. Vol. 41, No. 12. Р. 2645–2654.
2. Tubular heart valves: a new tissue prosthesis design--preclinical evaluation of the 3F aortic bioprosthesis / J.L. Cox [et al.] // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2005. Vol. 130, No. 2. Р. 520–527.
3. Valvular heart disease: the next cardiac epidemic / J.L. d'Arcy [et al.] // Heart.

2011. Vol. 97. Р. 91–93.

1. Vascular complications with transcatheter aortic valve implantation using the 18 Fr Medtronic CoreValve System: the Rotterdam experience / N.M. Van Mieghem [et al.] // EuroIntervention. 2010. Vol. 5. Р. 639–673.
2. Very late outcomes for mitral valve replacement with the Carpentier-Edwards pericardial bioprosthesis: 25-year follow-up of 450 implantations / T.

182

Bourguignon [et al.] // The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. 2014. Vol. 148, No. 5. P. 2004–2011.

1. Vesely I. Invited Review Transcatheter Valves: A Brave New World // The Journal of Heart Valve Disease. 2010. Vol. 19. Р. 543–558.
2. Vesely I. The evolution of bioprosthetic heart valve design and its impact on durability // Cardiovascular Pathology. 2003. Vol. 12. Р. 227–286.
3. Vesey I., Boughner S., Tong T. Tissue buckling as a mechanism of bioprosthetic valve failure // The Annals of Thoracic Surgery. 1988. Vol. 48. Р. 302–308.
4. Xenopericardial graft selection for valve apparatus of transcatheter heart valve bioprosthesis / E. A. Ovcharenko [et al.] // Biomedical Engineering. 2016. Vol. 49, No. 5. P. 253–257.
5. Ye J., Soon J.L., Webb J. Aortic valve replacement vs. transcatheter aortic valve implantation: Patient selection // Annals of Cardiothoracic Surgery. 2012. Vol. 1, No. 2. Р. 96–99.
6. Zannis K., Folliguet T., Laborde F. New sutureless aortic valve prosthesis: another tool in less invasive aortic valve replacement // Current Opinion in Cardiology. 2012. Vol. 27, No. 2. Р. 125–129.
7. Zhu D., Zhao Q. Dynamic normal aortic root diameters: implications for aortic root reconstruction // The Annals of Thoracic Surgery. 2011. Vol. 91, No. 2. Р. 485–489.